

d'anticorps, c'est-à-dire de molécules immunitaires qui se lient à des molécules spécifiques. Nos cibles étaient des protéines exprimées par les neurones voméronasaux de divers mammifères et des protéines exprimées par les neurones olfactifs de mammifères, y compris l'homme. Aucune cible n'a été trouvée dans l'épithélium voméronasal de l'homme adulte. De surcroît, quand nous avons cherché les cellules gliales (des cellules de soutien des neurones), sous l'épithélium voméronasal, nous n'avons trouvé aucun faisceau nerveux.

Ces études confortent celles de N. Boehm et B. Gasser qui avaient observé que les neurones disparaissent de l'organe voméronasal de nourrisson dès la 36^e semaine de gestation. Elles corroborent aussi celles de I. Kjaer et B. Fischer-Hansen, à Copenhague, qui ont signalé une nette régression de l'organe voméronasal et une disparition du bulbe olfactif accessoire vers la fin de la vie utérine. Rien ne semble donc indiquer l'existence de la structure sur laquelle converge l'information voméronasale chez tous les autres mammifères. Enfin, Esmail Meisami et Junwar Bahtnagar, à l'Université de l'Illinois, ont observé que l'organe voméronasal et le bulbe olfactif accessoire sont absents chez les grands singes et les singes adultes de l'Ancien Monde, tandis qu'ils sont présents chez les singes adultes du Nouveau Monde.

Des phéromones humaines ?

Malgré tous ces résultats négatifs, bien des biologistes non spécialistes de l'organe voméronasal écrivent encore que l'organe de l'homme adulte est fonctionnel. La plupart se réfèrent aux résultats d'une équipe de recherche qui avait enregistré un signal électrique à la surface de l'ouverture de la cavité, en lui appliquant des stéroïdes. Ces stimulations n'engendrent pas de perception particulière chez les sujets, mais les physiologistes qui ont fait les expériences ont détecté des changements de la résistance électrique cutanée ou de la température, ainsi que des changements de la concentration sanguine en hormone LH, lors de très longues stimulations (plusieurs heures). On ignore les mécanismes par lesquels les stéroïdes exercent ces effets, mais le signal électrique, notamment, ne semble pas correspondre à la transmission d'une information au cerveau.

Serpent de mer resurgissant périodiquement, l'existence de phéromones humaines est souvent associée à l'organe voméronasal, et des associations hâtives de la sexualité aux phéromones sont abusivement utilisées à des fins commerciales. Pourtant très peu d'informations confortent cette association. Dans les années 1970, par exemple, on a demandé à des hommes et à des femmes d'estimer l'intensité odorante et le plaisir ressenti quand on leur faisait sentir des échantillons de sécrétions vaginales de quatre femmes prélevés durant 15 cycles. L'odeur des sécrétions vaginales varie considérablement selon les femmes et, aussi, selon les cycles successifs, pour une même donneuse, et aucun attrait pour ces odeurs n'a été observé.

Dans les années 1980, une autre équipe a étudié l'effet de l'androsténol, un composé que l'on trouve sous les aisselles masculines et qui est une phéromone sexuelle du porc. Le produit fut appliqué sur la lèvre supérieure de femmes volontaires, dont on étudiait le comportement : celui des femmes mises au contact du composé ne fut pas différent de celui de femmes qui n'avaient pas été exposées au produit ; notamment, les applications ne provoquèrent aucun éveil sexuel. En revanche, des hommes semblèrent éviter des fauteuils imprégnés de ce composé. Les mêmes conclusions ont été tirées d'expériences avec des acides gras à courtes chaînes (ces molécules sont des hydrocarbures portant un groupe acide carboxylique -COOH) que l'on trouve dans les sécrétions vaginales et qui attirent sexuellement les mâles des singes rhésus.

Toutefois, en 1971, la biologiste américaine Martha McClintock a signalé que l'application d'extraits axillaires de femmes, sous le nez d'autres femmes, entraînait une légère synchronisation des cycles menstruels (les extraits étaient déposés sur des tampons qui étaient appliqués pendant plusieurs heures). Comme le protocole expérimental avait été critiqué et que d'autres études, notamment avec des joueuses de basket-ball, n'avaient pas retrouvé les résultats annoncés, M. McClintock et sa collègue K. Stern ont repris cette étude en 1998 : cette fois, les physiologistes ont observé que des composés sans odeur, présents sous les aisselles de femmes en fin de phase folliculaire (avant l'ovulation), avancent le pic de LH chez les femmes exposées (ce pic correspond à l'ovula-

tion) et raccourcissent leurs cycles menstruels. Quand les sécrétions axillaires sont prélevées au moment de l'ovulation, l'effet est inverse : le pic de LH est retardé, et le cycle des femmes stimulées est allongé. Notons que ces études n'invoquent aucun rôle de l'organe voméronasal et que le mode d'action de ces substances, qui sont appliquées sur la peau pendant de longues périodes, n'est pas connu. Il n'est pas impossible qu'un effet phéromonal fasse intervenir le système olfactif, le nerf terminal (qui innerve la cavité nasale de tous les mammifères et dont ignore complètement la physiologie) ou encore l'organe septal de Maséra (un petit îlot de récepteurs olfactifs, en position avancée dans le nez), s'il existe chez l'homme. Enfin, de nombreux facteurs physiologiques régulent le comportement sexuel et social de l'espèce humaine. Penser aujourd'hui que l'on pourrait trouver un « Viagra » olfactif relève plus des fantasmes et de la pensée magique que de la réalité scientifique.

En découvrant l'organe voméronasal, Jacobson a commencé un travail que les neurophysiologistes n'ont pas achevé, loin s'en faut. Si cet organe détecte effectivement des composés sécrétés par des congénères, son activation déclenche des effets encore très mal connus. L'information voméronasale semble, chez les rongeurs, particulièrement importante dans les premières relations sexuelles. En est-il de même pour les autres mammifères, chez qui on ne sait à peu près rien sur le rôle physiologique de cet organe ?

Didier TROTIER est chercheur au Laboratoire de neurobiologie sensorielle, à l'ENSIA (Massy), et au Laboratoire de physiologie oro-faciale de l'Université Paris 7. Kjell DØVING est professeur de physiologie au Département de biologie de l'Université d'Oslo.

D. TROTIER et K.B. DØVING, *Anatomical Description of a New Organ in the Nose of Domesticated Animals*, by Ludvig Jacobson (1813), in *Chemical Senses*, vol. 23, pp. 743-754, 1998.

K.B. DØVING et D. TROTIER, *Structure and Function of the Vomeronasal Organ*, in *The Journal of Experimental Biology*, vol. 201, pp. 2913-2925, 1998.

Symposium on Pheromone Communication and Interaction with Hormones. Olfaction and Taste XII, in *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 855, pp. 333-392, 1998.



L'homme-oiseau

ROLAND LEHOUCQ

L'homme est trop lourd pour voler facilement : seuls les sportifs de haut niveau équipés d'appareils ultralégers y parviennent.

Dédale et son fils Icare ont voulu voler, sans grand succès. Dédale voulait s'échapper du labyrinthe du roi Minos en se fabriquant des ailes avec des plumes collées à la cire. Le vol d'Icare finit tragiquement : Icare s'étant trop approché du Soleil, la cire fondit, Icare s'abîma en mer et se noya. Léonard de Vinci imagina également de fabuleuses, mais inefficaces, machines à voler. Il est bien difficile de voler : le rêve d'Icare et de Léonard de Vinci est-il réalisable ?

Le vol comporte deux étapes : le décollage et la sustentation en vol. Pour décoller, il faut que la force ascensionnelle soit supérieure au poids ; pour le maintien en l'air, il faut, en plus, vaincre les frottements qui diminuent la vitesse, donc la force de sustentation. Nous verrons comment ces contraintes imposent une masse limite aux oiseaux, puis à quelles conditions un être humain peut voler, mû par sa seule force musculaire.

VAINCRE LE POIDS

Chacun a déjà fait l'expérience de tendre une main par la fenêtre d'une voiture roulant à vive allure. La main est repoussée par une force d'autant plus grande que la main est redressée : horizontale, elle n'est presque pas repoussée, tandis que, verticale, la main subit le vent de plein fouet, et la force vers l'arrière est considérable. Plus la voiture roule rapidement, plus le vent relatif, et la force sur la main, sont importants.

Sur une aile, la force, proportionnelle à la surface, est encore supérieure. Cette

force est aussi proportionnelle au carré de la vitesse. Pourquoi ? Parce que la force exercée par les molécules qui rebondissent sur l'aile est proportionnelle à leur vitesse et au nombre de molécules frappant la surface. Ce nombre est, lui aussi, proportionnel à la vitesse ; donc, au total, la force «de portance» dépend du carré de la vitesse relative de l'air.

Dernier point, la force dépend du coefficient de portance, déterminé par la forme de l'aile et par l'angle d'attaque : sa valeur typique est de l'ordre de 0,3.

Il est ainsi plus facile de décoller face au vent : à la vitesse de l'avion s'ajoute la vitesse du vent, et la force résultant du vent relatif sur les ailes est plus forte. Pour le vol à altitude constante, il suffit que le déplacement soit suffisamment rapide par rapport à l'air pour que la portance compense le poids.

Nous avons tous vu, sur les films des premiers essais de vol, les sauts de puce des hommes-oiseaux qui battaient des ailes. Ils n'avaient pas saisi que, si le mouvement descendant des ailes les soulevait, le mouvement ascendant des ailes les plaquait au sol. Les oiseaux volent parce qu'ils donnent aux ailes un mouvement de vrille : l'angle, lors de la montée de l'aile, n'est pas équivalent à celui de la descente. Subtil.

La surface des ailes d'un oiseau est approximativement proportionnelle au carré de sa taille, alors que son poids est proportionnel à son volume, donc au cube de sa taille. Tous calculs (simples) faits, la vitesse pour laquelle la portance est égale au poids est proportionnelle à la

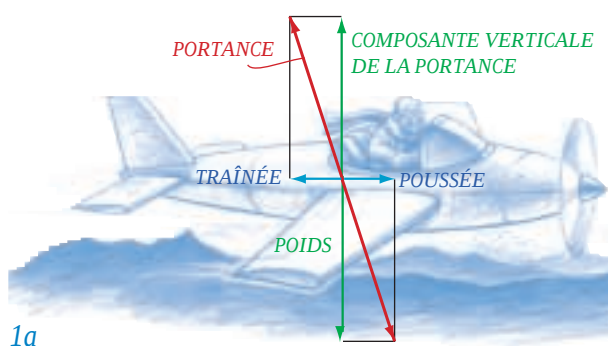
racine carrée de la taille. Les grands oiseaux doivent voler plus vite que les petits pour se maintenir en l'air et doivent aussi courir plus vite pour décoller. De très grands oiseaux, tel l'albatros, dont l'envergure est de 2,5 mètres pour une masse de dix kilogrammes, ne peuvent décoller du sol et doivent se lancer d'une hauteur.

Finalement, un avion n'est rien d'autre qu'une voiture rapide à laquelle on a adjoint de grandes ailes légèrement inclinées ; encore faut-il penser à la propulsion après le décollage...

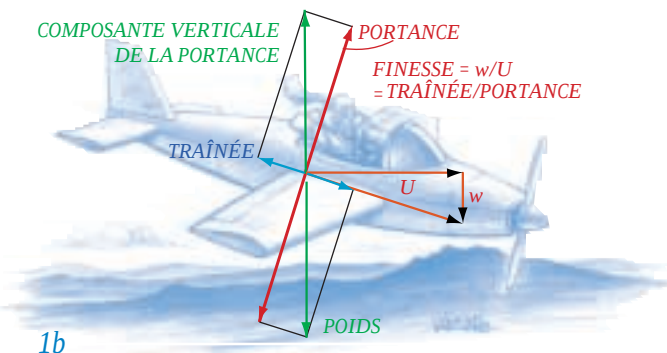
LE VOL HORIZONTAL

Après avoir vaincu le poids, l'objet volant s'élève, mais peut-il pour autant se maintenir en vol ? En ajustant l'angle de son aile par rapport au vent relatif, il peut monter ou descendre, à condition que sa vitesse ne diminue pas trop. Le vol horizontal nécessite de vaincre les frottements aérodynamiques, ou traînée, de manière à conserver la vitesse, donc la portance (voir la figure 1a). Comme la force de portance, la traînée est proportionnelle au carré de la vitesse relative de l'air. La puissance nécessaire à la sustentation, égale au produit de la traînée par la vitesse, varie donc comme le cube de cette vitesse. Le vol rapide est donc énergétiquement coûteux.

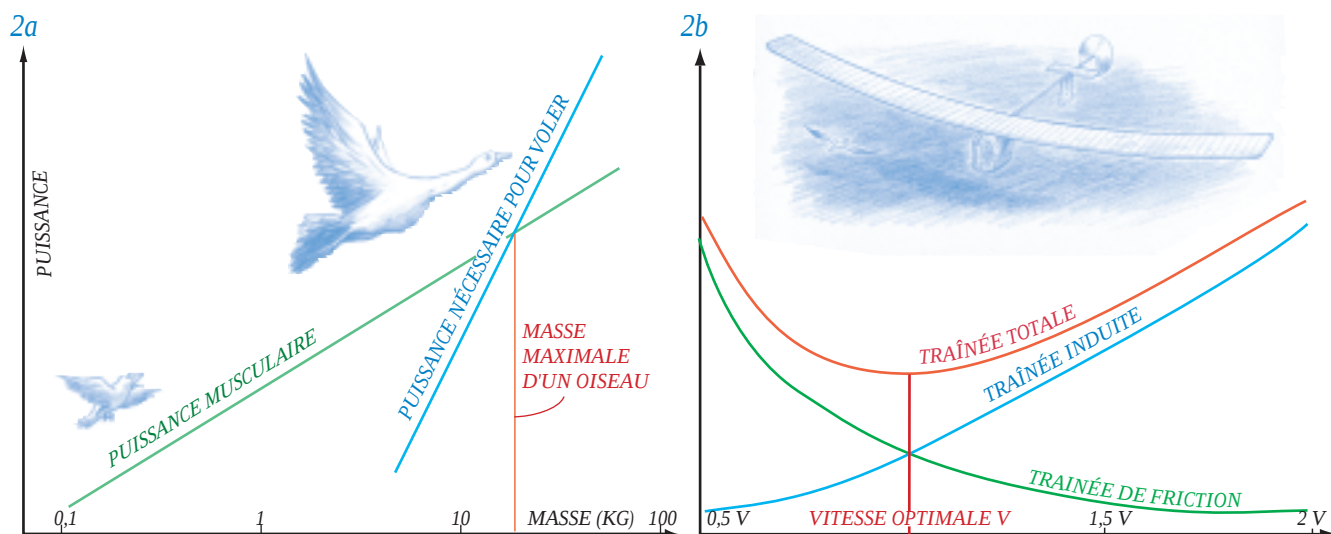
Revenons à l'oiseau. La surface de ses ailes variant comme le carré de sa taille, sa vitesse comme la racine carrée de la taille et la masse comme le cube de la taille, la puissance à dépenser pour contrebalancer l'effet des frottements



1a



1b



varie comme la masse à la puissance $7/6$. Cette puissance doit être fournie par les muscles de l'oiseau ; or cette puissance musculaire varie comme la masse à la puissance $3/4$, plus lentement que la puissance à dépenser.

Un oiseau aura donc une taille maximale, déterminée par sa capacité à fournir la puissance nécessaire au maintien de sa vitesse de vol (voir la figure 2a). Les oiseaux ont effectivement une masse limite (environ 15 kilogrammes), et les gros oiseaux, tels le condor et l'albatros, sont contraints d'économiser leur énergie et préfèrent planer, alors que pigeons et moineaux n'hésitent pas à battre des ailes.

La traînée totale, qui freine la progression, est la somme de deux termes : d'une part, les frottements aérodynamiques, dus au contact de l'air visqueux sur la surface de l'aile, et, d'autre part, la traînée induite par le mouvement, qui résulte de la modification de la quantité de mouvement de l'air qui rencontre l'aile. La traînée induite est la composante horizontale de la portance, alors que sa composante verticale doit compenser le poids (la portance est toujours perpendiculaire à l'aile).

Lorsque l'on augmente la vitesse de l'avion, la portance totale augmente. Sans action sur l'inclinaison ou la forme de l'aile, qui modifie le coefficient de portance, l'avion monterait. Afin de se maintenir en vol horizontal, le pilote agit sur les ailes, de manière que la portance totale diminue. Comme la composante verticale de la portance doit être constante (sinon l'avion monterait au descendrait), la portance totale se rapproche de la verticale et sa composante horizontale, donc la traînée induite, diminue. Proportionnelle à l'inverse du carré de la vitesse par rapport à l'air, la traînée induite croît démesurément à basse vitesse, rendant prohibitif le coût énergétique du vol lent. Ainsi, tout oiseau et toute machine volante ont

une vitesse de vol énergétiquement optimale (voir la figure 2b). La traînée induite peut être diminuée en utilisant des ailes très effilées, c'est-à-dire dont le rapport d'aspect, le quotient de la longueur de l'aile sur sa largeur, est grand.

VOLER EN PLANANT

Si l'énergie nécessaire à la propulsion n'est pas fournie, elle sera prélevée à l'énergie potentielle gravitationnelle et, comme pour un cycliste en roue libre dans une descente, l'altitude diminuera : un avion dont le moteur s'arrête descend inéluctablement. Pour planer longtemps, les grands oiseaux doivent tirer parti des mouvements atmosphériques ascendants qui prennent naissance près des crêtes des montagnes ou qui résultent des montées d'air chaud dues à la poussée d'Archimède.

Le rapport de la portance et de la traînée est la finesse, qui détermine la qualité d'un planeur : les ailes de grande finesse sont les plus économes énergétiquement. Une finesse de dix, typique de celle d'un oiseau de taille moyenne, signifie qu'il peut parcourir dix kilomètres en planant en partant d'un kilomètre d'altitude. Cela signifie aussi que la traînée est égale au $1/10$ de la force de portance. La finesse d'une aile est donc une caractéristique aérodynamique (voir la figure 1b). Quel est son lien avec les autres caractéristiques des ailes ? En pratique, il faut des ailes lisses, pour minimiser les frottements, et très effilées, pour minimiser la traînée induite.

LE VOL HUMAIN

Le bilan n'est pas favorable au vol humain autonome. L'homme pèserait trop lourd (sans même compter le poids des ailes et du dispositif de propulsion) au regard de la puissance qu'il est capable de fournir pour se maintenir en l'air. Essayons pourtant de jouer avec les chiffres. Une

masse totale homme-machine de 100 kilogrammes (un pilote de 65 kilogrammes, 25 kilogrammes d'ailes et de cockpit, et 10 kilogrammes de mécanisme de propulsion) avec une finesse de 20, celle d'un albatros, donne une force de traînée équivalente à cinq kilogrammes. Un cycliste entraîné peut fournir une puissance de 250 watts pendant plusieurs minutes. Cette puissance dépasse la résistance de la force de traînée si la vitesse de l'engin est inférieure à cinq mètres par seconde.

Faire voler une masse de 100 kilogrammes à cette vitesse requiert des ailes très grandes, de plus de 100 mètres carrés chacune ! Pour minimiser la traînée induite, il faut aussi qu'elles soient très effilées et très lisses. Un rapport d'aspect de 12 (donc des ailes 12 fois plus longues que larges), analogue à celui de l'albatros, impose une longueur d'environ 33 mètres. Toute la difficulté de l'entreprise est là : construire des ailes suffisamment résistantes, pesant 25 kilogrammes et faisant 66 mètres d'envergure. En 1977 décolla pour la première fois une machine volante propulsée par un être humain, toute en mylar, kevlar et fibres de carbone. Le rêve d'Icare et de Dédale fut enfin réalisé en 1988, quand un avion propulsé par la seule force musculaire humaine parvint à franchir en quatre heures les 120 kilomètres qui séparent le Nord de la Crète et l'île de Santorin.

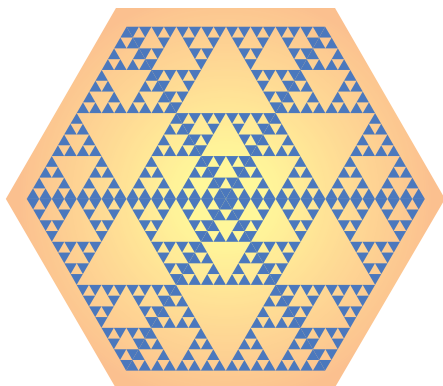
Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

H. LIN, *Fundamentals of zoological scaling*, in *American Journal of Physics*, vol. 50, p. 72, 1982.

S. VOGEL, *Life in Moving Fluids*, Princeton University Press, 1994.

H. TENNEKES, *The Simple Science of Flight*, MIT Press, 1997.

M. DRELA et J. LANGFORD, *Le vol humain propulsé*, in *Pour la Science*, janv. 1986.



Le triangle omniprésent

IAN STEWART

Une même forme fractale se rencontre dans les tours d'Hanoï et dans le triangle de Pascal.

Les mathématiques fascinent par l'étrangeté de certains nombres, de certaines figures et, plus encore, par des relations étonnantes entre des sujets apparemment indépendants. J'ai ainsi beaucoup de plaisir à retrouver le triangle de Sierpinski (voir la figure 1) là où je ne l'attends pas. Cette forme triangulaire est une fractale : les parties sont des versions réduites du tout. Elle apparaît dans les problèmes d'auto-intersection de courbes, dans le triangle de Pascal, dans le problème des tours d'Hanoï, et elle est liée au curieux nombre rationnel 466/885 (environ 0,52655). Nous verrons que ce nombre mériterait d'être inscrit sur la liste des «nombres qui ont plus d'intérêt qu'il n'y paraît», à côté de π , e , le nombre d'or...

Le mathématicien polonais Waclaw Sierpinski conçoit son triangle en 1915 : partant d'un triangle équilatéral, il supprime le triangle qui joint les milieux des côtés, puis répète le même type de suppression pour les trois triangles restants, et ainsi de suite. La répétition indéfinie de cette opération conduit à une courbe qui se recoupe en chacun de ses points... ou presque. Les courbes possédant cette étrange propriété géométrique semblaient naguère «pathologiques». Le triangle de Sierpinski ne se recoupe pas aux trois sommets du triangle initial, mais Sierpinski proposa de corriger cette imperfection en assemblant six exemplaires de son triangle en hexagone (voir la figure en haut à gauche) ; chaque point de la courbe obtenue est une ramification. Nathan Cohen, astronome à l'Université de Boston, a récemment construit des antennes aux formes proches du triangle de Sierpinski, afin de mieux récupérer les ondes radio.

En 1890, le mathématicien français Édouard Lucas a trouvé une relation entre le triangle de Sierpinski et le triangle de Pascal, où chaque nom-

bre est la somme des deux nombres situés au-dessus de lui (voir la figure 2). Ces nombres sont aussi les «coefficients du binôme» (les coefficients du polynôme $(a + b)^n$). Le k -ième nombre de la n -ième ligne (les indexations commencent à 0) est aussi le nombre de combinaisons de k objets parmi n objets distincts. Lucas a montré que les coefficients du binôme impairs forment une version discrète du triangle de Sierpinski, c'est-à-dire un stade intermédiaire de sa construction.

Autrement dit, la plupart des coefficients du binôme sont pairs, puisque ceux-ci occupent toute la surface du triangle initial, tandis que les coefficients impairs sont les points de la courbe. Le quotient du nombre de coefficients impairs par le nombre de coefficients pairs tend vers zéro lorsque le nombre n de lignes augmente. Par ailleurs, David Singmaster, à Londres, a montré que, pour tout entier m , presque tous les coefficients binomiaux sont divisibles par m .

Lucas semble avoir été hanté par le triangle de Sierpinski. En 1883, sous le pseudonyme de M. Claus (une anagramme de Lucas), il fabriqua et vendit le jeu des tours d'Hanoï : sur un socle portant trois tiges, huit disques (ou moins) sont enfilés par ordre décroissant de rayons (voir la figure 3). Le jeu consiste à déplacer les disques un à un, de tige en tige, sans qu'aucun disque repose jamais sur un disque de rayon inférieur ; on doit finalement retrouver les huit disques dans le même ordre sur une autre tige.

La solution a une structure récurrente : la solution du jeu à $(n + 1)$ disques se déduit de celle du jeu à n disques. Par exemple, pour un jeu à quatre disques, ignorez le grand disque de base et déplacez les trois disques sur une tige libre ; il vous restera alors à déplacer le grand disque sur la tige libre et à déplacer à nouveau les trois disques sur lui.



1. Le triangle de Sierpinski s'obtient quand on élimine des triangles équilatéraux d'un triangle initial.